

Santhu Alastalo

# EPÄPUHTAUKSIEN LEVIÄMINEN SI- SÄILMAAN RAKENTEISSA OLEVISTA RAOISTA JA HALKEAMISTA

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Joulukuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Santtu Alastalo: Epäpuhtauksien leviäminen sisäilmaan rakenteissa olevista raoista ja halkeamista  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Joulukuu 2019

---

Tässä kandidaatintyössä käsittelen yleisimpiä rakenteiden läpi liikkuvia epäpuhtauksia ja niiden kulkeutumista sisäilmaan. Työssä käsittelen aikaisempia tutkimuksia liittyen epäpuhtauksien kulkeutumiseen, minkä lisäksi tarkastelen sisäilma- ja kuntotutkimusraportteja todellisista kohteista ja selvitän, miten epäpuhtauksien leviämistä ja rakenteiden ilmatiiviyttä on niissä käsitelty.

Kosteus- ja sisäilmateknisten kuntotutkimusten kohteena olevat rakennukset ovat usein vanhempaa rakennuskantaa, joissa ilmatiivyyteen ei ole rakennusajankohtana välttämättä kiinnitetty erityisemmin huomiota. Rakennusten huono ilmatiiveys hankaloittaa myös painesuhteiden hallintaa. Vanhoissa rakennuksissa rakenteiden huono ilmatiiveys ja painesuhteiden hankala hallinta luovat otolliset olosuhteet epäpuhtauksien leviämiseksi sisäilmaan. Edellä mainittuja olosuhteita oli myös havaittavissa case-kohteissa.

Epäpuhtauksien kulkeutumisen arvioinnissa on aina oleellista mitata rakenteen ulkovaipan yli vallitsevat painesuhteet, koska painesuhteet vaikuttavat suoraan ilmavuotomääriin ja näin myös mahdollisten epäpuhtauksien kulkeutumiseen. Tutkimusten perusteella on kuitenkin havaittavissa, että jo hyvinkin pienillä paine-eroilla voi rakenteiden epätiiveyskohtien kautta kulkeutua mahdollisia epäpuhtauksia sisäilmaan. Case-kohteissa oli havaittu rakenteissa vuotokohtia merkkiainekokeilla jopa alle 3 Pa paine-erolla. Lisäksi aiemmissa tutkimuksissa oli havaittu, että jo 4 Pa paine-eron aiheuttama voima riittää liikuttamaan pienhiukkasten ja karkeiden hiukkasten ko-koisia partikkeleja alle 1 mm raoista.

Kirjallisuuslähteiden perusteella sisäilmasta otetut mikrobinäytteet eivät välttämättä osoita selkeäkään kosteus- ja mikrobivaurion kohdalla sisäilmassa merkkejä mikrobeista. Tutkimuksissa oli myös havaittavissa vaihtelua tuloksissa, vaikka olosuhteet olisivat olleet identtisiä. Sisäilman mikrobinäytteet vaikuttavat tutkimusten perusteella epäluotettavalta menetelmältä epäpuhtauksien kulkeutumisen arvioinnissa. Tulevaisuudessa mikrobien käyttäytymisestä tarvittaisiin lisätutkimuksia, jotta ymmärrettäisiin nykyistä paremmin, mistä vaihtelevat tulokset sisäilmanäytteissä johtuvat.

Merkkiainekoe vaikuttaa case-kohteiden perusteella hyvin toimivalta tutkimusmenetelmältä tutkittaessa rakenteen läpi kulkeutuvia ilmavirtauksia. Merkkiainekaasu pääsee kulkeutumaan rakenteista kuitenkin hiukkasmaisia epäpuhtauksia helpommin, joten olemassa on riski, että vuoto-reittinä pidetään sellaista vuotoa, jonka kautta epäpuhtauksia ei oikeasti pääse leviämään. Merkkiainekokeelle olisi hyödyllistä suorittaa tulevaisuudessa tarkentavia tutkimuksia, jotta mahdolliset virhelähteet voitaisiin minimoida.

Avainsanat: Sisäilman epäpuhtaudet, merkkiainekoe, paine-ero, sisäilman mikrobinäytteet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. YLEISIMMÄT RAKENTEIDEN KAUTTA KULKEUTUVAT EPÄPUHTAUDET .....	2
2.1 Kaasumaiset epäpuhtaudet.....	2
2.1.1 Radon .....	2
2.1.2 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet .....	3
2.1.3 Epäorgaaniset kaasumaiset yhdisteet.....	4
2.2 Hiukkasmaiset epäpuhtaudet .....	5
2.3 Mikrobiologiset epäpuhtaudet .....	5
3. EPÄPUHTAUKSIEN KULKEUTUMINEN SISÄILMAAN .....	7
3.1 Yleistä epäpuhtauksien kulkeutumisesta .....	7
3.2 Aikaisempia tutkimuksia epäpuhtauksien kulkeutumisesta.....	7
4. ILMATIIVEYS JA EPÄPUHTAUKSIEN KULKEUTUMINEN .....	10
4.1 Kuntotutkimukset .....	10
4.2 Painesuhteiden mittaus.....	10
4.3 Merkkiainekoe.....	11
4.4 Merkki- ja puhdassavututkimukset .....	12
4.5 Lämpökuvaus.....	13
4.6 Ilmavuotoluku.....	14
4.6.1 Rakennuksen ilmavuotoluvun määrittäminen .....	14
4.6.2 Ilmavuotoluvun kehittyminen .....	15
5. TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTO.....	17
6. SISÄILMA- JA KUNTOTUTKIMUSTEN RAPORTTIEN TARKASTELUA .....	18
6.1 Case-kohteet.....	18
6.1.1 Case 1 .....	18
6.1.2 Case 2 .....	19
6.1.3 Case 3 .....	21
6.1.4 Case 4 .....	26
6.1.5 Case 5 .....	27
6.2 Yhteenveto case-kohteista .....	28
7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	31
LÄHTEET .....	33

# 1. JOHDANTO

Sisäilmaongelmat ovat olleet viime aikoina näkyvästi esillä mediassa. Huoli sisäilmaongelmista on ihan ymmärrettävää, sillä esimerkiksi Täubel et al. (2017, s. 9) arvioivat tutkimuksessaan ihmisten viettävän keskimäärin yli 90 % ajastaan sisäympäristöissä. Reijula et al. (2012, s. 10) mukaan esimerkiksi päiväkodeissa ja kouluissa merkittävien kosteus- ja homevaurioiden esiintyvyys on 12–18 % kerrosalasta, kun taas hoitolaitoksissa esiintyvyys on jopa 20–26 % kerrosalasta. Suomessa kosteus- ja mikrobivauriot ovat siis hyvin yleinen ongelma, vaikka ne ovatkin vain yksi osa kaikista sisäilman epäpuhtauksista.

Sisäilmaongelmiin yhdistetään usein haitallisia terveysvaikutuksia, mutta ei vielä tiedetä, mitkä tekijät ja mitkä mekanismit ovat oireilun taustalla (Kosteus- ja homevaurioista oireileva potilas: Käypä hoito -suositus, 2016). Kosteus- ja sisäilmateknisessä kuntotutkimuksessa on oleellista arvioida epäpuhtauksien leviämistä sisäilmaan, jotta terveysviranomaiset pystyvät puolestaan arvioimaan käyttäjiin kohdistuvaa terveyshaittaa ja kiinteistön haltija saa lähtökohdat tarvittavien korjaustoimenpiteiden kiireellisyydelle.

Kosteus- ja sisäilmateknisten kuntotutkimusten kohteena olevat rakennukset ovat usein vanhempaa rakennuskantaa, joissa ilmatiiveyteen ei ole rakennusajankohtana välttämättä kiinnitetty erityisemmin huomiota. Vanhoissa rakennuksissa rakenteiden huono ilmatiiveys ja painesuhteiden hankala hallinta luovat otolliset olosuhteet epäpuhtauksien leviämiselle sisäilmaan.

Kandidaatintutkielmani teoriaosuudessa käyn läpi kirjallisuutta oleellisimmista rakenteiden läpi liikkuvista epäpuhtauksista, epäpuhtauksille annetuista raja-arvoista, epäpuhtauksien kulkeutumiseen vaikuttavista tekijöistä sekä epäpuhtauksien kulkeutumiseen liittyvistä tutkimuksista. Tutkielmassani käyn myös läpi sisäilma- sekä kuntotutkimuksien raportteja ja tarkastelen miten epäpuhtauksien leviämistä ja rakenteiden ilmatiiviyttä on tutkimuksissa käsitelty. Lopuksi vielä summaan tutkielmani keskeisimmät päätelmät ja tulokset yhteenvedoksi ja pohdin aiheeseen liittyviä jatkotutkimuskysymyksiä.

## **2. YLEISIMMÄT RAKENTEIDEN KAUTTA KULKEUTUVAT EPÄPUHTAUDET**

Sisäilmaan kulkeutuvat epäpuhtaudet voivat olla peräisin ulkoilmasta, maaperästä tai vaurioituneiden rakenteiden sisältä. Epäpuhtaudet voivat olla kaasumaisia tai hiukkasmaisia. Ulkoilmasta kulkeutuvat epäpuhtaudet ovat pääosin hiukkasmaisia epäpuhtauksia (Hänninen & Asikainen 2013, s. 74). Yleisimpiä kaasumaisia epäpuhtauksia ovat muun muassa radon, haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC-yhdisteet), hiilimonoksidi sekä tupakoinnista syntyvät yhdisteet (Hänninen & Asikainen 2013, s. 38–39). Kosteus- ja mikrobivaurioituneista rakenteista sisäilmaan voi rakenteiden raoista kulkeutua rakenteiden mikrobikasvustosta johtuvia epäpuhtauksia, joista osa voi olla kaasumaisia ja osa hiukkasmaisia (Reijula et al. 2012, s. 80–88).

Suomessa epäpuhtaan sisäilman aiheuttamaksi tautikuormaksi on arvioitu noin 13 000 menetettyä elinvuotta, joista ilmanvaihdon ilmapuotojen kautta kulkeutuvien ulkoilman epäpuhtauksien osuus on noin 57,5 % ja sisäilman lähteiden osuus noin 42,5 %. Suurin osa sisäilman aiheuttamasta tautikuormasta on peräisin pienhiukkasista, joiden osuus tautikuormasta on noin 66,6 %. Radonin osuus tautikuormasta on toiseksi suurin, noin 16,0 %. (Hänninen & Asikainen 2013, s. 38–39, 74.)

Hänninen ja Asikainen (2013, s. 74) ovat arvioineet kosteudesta ja homeesta aiheutuneen tautikuorman osuudeksi noin 2,6 % Suomen kokonaistautikuormasta, mikä kuulostaa pieneltä verrattuna Reijula et al. (2012) esittämiin lukemiin kosteus- ja homevaurioiden esiintyvyydestä. Reijula et al. (2012, s. 10) mukaan kosteus- ja homevaurioiden esiintyvyys on pien- ja rivitaloissa 7–10 %, päiväkodeissa ja kouluissa 12–18 % ja hoitolaitoksissa jopa 20–26 % kerrosalasta.

### **2.1 Kaasumaiset epäpuhtaudet**

#### **2.1.1 Radon**

Radon on ihmisen aisteilla huomaamaton radioaktiivinen jalokaasu, jota syntyy maan-kuoressa uraanin hajoamisen välituotteena. Radon hajoaa poloniumiksi ja siitä vakaaksi lyijyksi. Radon ja polonium ovat radioaktiivisia ja lähettävät alfasäteilyä. Radioaktiiviset alfasäteilyä lähettävät aineet ovat terveydelle vaarallisia joutuessaan elimistöön, esimer-

kiksi hengitysilman mukana. Radon on kaasumainen, joten se pääsee liikkumaan helposti maaperässä. Radonia voi kulkeutua huoneilmaan maaperästä rakennuksen perustuksissa olevista raoista, talousveden käytön yhteydessä sekä joissain määrin myös rakennusmateriaaleista. Suurin radonin lähde on maaperä. Maaperässä oleva radon vaikuttaa pääosin pohjakerrokseen, kun taas kerrostalojen yläkerroksissa lähes kaikki radon on peräisin rakennusmateriaaleista. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003, s. 31–34; Arvela et al. 2012, s. 12–16.)

Ilman radonpitoisuutta mitataan radonin lähettämän säteilyn avulla. Säteilyä ilmaistaan aktiivisuuden yksiköllä becquerel (Bq). Sosiaali- ja terveysministeriön ionisoivaa säteilyä koskevan asetuksen (1044/2018) mukaan asunnon huoneilman radonpitoisuuden vuosikeskiarvon yläraja on  $300 \text{ Bq/m}^3$  ja uusi asunto pitää suunnitella ja rakentaa siten, että radonpitoisuuden vuosikeskiarvo pysyy alle  $200 \text{ Bq/m}^3$ . (Sosiaali- ja terveysministeriö 2018.)

Maaperän radonpitoisuus vaihtelee sijainnin perusteella. Suomessa korkeimmat maaperän radonpitoisuudet löytyvät seuraavista maakunnista: Itä-Uusimaa, Kymenlaakso, Päijät-Häme, Pirkanmaa, Etelä-Karjala ja Kanta-Häme. Itä-Uudellamaalla kellarittomissa omakotitaloissa on yksittäisissä kohteissa mitattu jopa yli  $2\,000 \text{ Bq/m}^3$  vuosikeskiarvoja. (Mäkeläinen et al. 2009, s. 18–20.)

### 2.1.2 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet eli VOC-yhdisteet (Volatile Organic Compounds) ovat sisäilmaolosuhteissa yleensä kaasumaisessa tai höyrymäisessä muodossa, mutta heikommin haihtuvat yhdisteet voivat myös olla hiukkasmuodossa tai partikkeleihin adsorboituneina. Yleisimpiä VOC-yhdisteitä ovat alkaanit, aldehydit, aromaattiset hiilivedyt, esterit, halogenoidut yhdisteet, ketonit sekä terpeenit. VOC-yhdisteitä voi päätyä sisäilmaan ulkoilmasta, jossa niitä syntyy liikenteen päästöistä ja energian tuotannon epätäydellisistä palamisreaktioista. Sisäilman muita yleisiä VOC-lähteitä ovat myös muun muassa maalit, liimat, liuottimet ja lattianpäällysteet. (Rundt et al. 2015, s.156–163.)

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutta ilmoitetaan lyhenteellä TVOC (Total Volatile Organic Compounds). Sisäilman toimenpideraja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden tolueenivasteella lasketulle kokonaispitoisuudelle on  $400 \mu\text{g/m}^3$ . Yksittäiselle

haihtuvalle orgaaniselle yhdisteelle toimenpideraja sisäilmassa tolueenivasteella lasketuna on  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lisäksi 2,2,4-trimetyyli-1,3-pentaalidioli di-isobutyraatille (TXIB), 2-etyyli-1-heksanolille (2EH) sekä naftaleenille on määritelty toimenpiderajoiksi  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja styreenille  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Naftaleenin kohdalla myös hajukynnyksen ylittymistä pidetään toimenpiderajana. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015; Valvira 2016b.)

Kaikkia oleellisia VOC-yhdisteitä, kuten formaldehydiä, ei saada määriteltyä perinteisillä VOC-mittauksilla, vaan niille on omat mittausmenetelmät (Rundt et al. 2015, s.156–163). Formaldehydin pitoisuudelle sisäilmassa on määritelty vuosikeskiarvon ylärajaksi  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja 30 minuutin mittauksen keskiarvopitoisuuden ylärajaksi  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Formaldehydin lähteitä ovat muun muassa tupakansavu, puutuotteet, maalit sekä muut sisustus-tekstiilit. Tupakansavulle on määritelty oma toimenpideraja-arvo  $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sisäilman nikotiinipitoisuudesta mitattuna. Tupakansavua ei saa myöskään esiintyä toistuvasti aistivaraisesti tunnistettavasti sisäilmassa. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015; Valvira 2016b.)

### 2.1.3 Epäorgaaniset kaasumaiset yhdisteet

Sisäilmaan vaikuttavista epäpuhtauksista epäorgaanisia kaasumaisia yhdisteitä ovat muun muassa hiilidioksidi, hiilimonoksidi, otsoni, ammoniakki, rikkiyhdisteet ja typenoksidit (Rundt et al. 2015, s.156–163). Epäorgaaniset kaasumaiset yhdisteet ovat pääosin peräisin liikenteestä ja voimalaitoksien energian tuotannosta (World Health Organization, 2006 s. 395; World Health Organization, 2010 s. 55, 201–202). Hiilidioksidin suurin lähde sisäilmaan on ihminen.

Asumisterveysasetuksessa on määritelty toimenpiderajoja hiilimonoksidille ja hiilidioksidille. Sisäilman hiilimonoksidipitoisuudelle määritelty hetkellinen toimenpideraja on  $7 \text{ mg}/\text{m}^3$ , joka ei saa ylittyä. Hiilidioksidipitoisuuden toimenpideraja puolestaan ylittyy, jos pitoisuus sisäilmassa on  $2\,100 \text{ mg}/\text{m}^3$  ( $1\,150 \text{ ppm}$ ) suurempi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015.)

## 2.2 Hiukasmaiset epäpuhtaudet

Hiukasmaiset epäpuhtaudet voidaan jaotella kokonsa perusteella pienhiukkasiin ( $PM_{2.5}$ ) ja hengitettäviin karkeisiin hiukkasiin ( $PM_{10}$ ). Pienhiukkasten aerodynaaminen halkaisija on alle  $2,5\ \mu m$  ja hengitettävien hiukkasten halkaisija on yli  $2,5\ \mu m$ , mutta alle  $10\ \mu m$ . Kaikkia ilmassa leijuvia hiukkasia sanotaan kokonaisleijumaksi, josta suurin osa on karkeaa pölyä. Hiukasmaisten epäpuhtauksien lähteet tulevat suurimmaksi osaksi sisäilmaan ulkoilman kautta ja ne ovat syntyneet pääasiassa liikenteestä ja energiantuotannosta. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003.)

Hiukasmaisille epäpuhtauksille on määritelty toimenpiderajoja asumisterveysasetuksessa. Sisäilmassa 24 tunnin mittauksessa hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10}$ ) pitoisuus saa olla enintään  $50\ \mu g/m^3$  ja pienhiukkasten ( $PM_{2.5}$ ) pitoisuus enintään  $25\ \mu g/m^3$ . Teollisille mineraalikuiduille on annettu toimenpideraja  $0,2\ kuitua/cm^2$  kahden viikon aikana pinnoille laskeutuneesta pölystä. Asbestikuiduille toimenpideraja ylittyy, jos asbestikuituja löytyy pinnoille laskeutuneesta pölystä tai sisäilman asbestikuitujen pitoisuus ylittää rajan  $0,01\ kuitua/cm^3$ . (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015; Valvira 2016b.)

## 2.3 Mikrobiologiset epäpuhtaudet

Sisäilmassa esiintyy tavallisesti mikrobeja, jotka ovat muun muassa käyttäjistä ja ulkoilmasta peräisin. Rakenteiden mikrobikasvustosta voi olla osoituksena sisäilman tai rakenteiden tavallisesta poikkeava sieni-itiöpitoisuus, mikrobisuvusto tai mikrobien aineenvaihduntatuotteiden esiintyminen sisäilmassa (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003, s. 75–79; Valvira 2016c). Rakenteissa olevista mikrobikasvustoista voi kulkeutua sisäilmaan ilmavirtausten mukana hiukasmaisia bioaerosoleja (esimerkiksi sieni-itiöitä, rihmaston kappaleita ja hajoamistuotteita) ja kaasumaisia mikrobien tuottamia haihtuvia yhdisteitä eli MVOC-yhdisteitä (Weckström 2003). Bioaerosolien koko vaihtelee pääosin välillä  $0,1\text{–}10\ \mu m$ , suurimman osan ollessa kuitenkin luokkaa  $3\text{–}10\ \mu m$  (Nazaroff 2016, s. 61–78). Bioaerosolit ovat siis osa sisäilman hiukasmaisista epäpuhtauksista, ja bioaerosoleista suurin osa kuuluu karkeisiin hengitettäviin hiukkasiin.

Asumisterveysasetuksessa mikrobien toimenpiderajaksi todetaan seuraavaa: ”Toimenpiderajan ylittymisenä pidetään korjaamatonta kosteus- tai lahovauriota, aistinvaraisesti



todettua ja tarvittaessa analyyseillä varmistettua mikrobikasvua rakennuksen sisäpinnalla, sisäpuolisessa rakenteessa tai lämmöneristeessä silloin, kun lämmöneriste ei ole kosketuksissa ulkoilman tai maaperän kanssa, taikka mikrobikasvua muussa rakenteessa tai tilassa, jos sisätiloissa oleva voi sille altistua." Mikrobikasvu voidaan todentaa rakennusmateriaalista otetun näytteen mikrobien kasvatukseen perustuvilla laimennosarja- ja suoraviljelymenetelmillä tai analysoimalla näytettä mikroskopoimalla. Laimennossarjamenetelmään voidaan kerätä myös näyte pintasivelynä tai ilmanäytteenä. Ilmanäytteen osalta tosin vaaditaan myös muuta näyttöä toimenpiderajan ylittymisestä. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015.)

### 3. EPÄPUHTAUKSIEN KULKEUTUMINEN SISÄIL- MAAN

#### 3.1 Yleistä epäpuhtauksien kulkeutumisesta

Epäpuhtaudet kulkeutuvat sisäilmaan ulkoilmasta, maaperästä tai rakenteiden sisältä pääosin konvektiolla tai diffuusiolla. Konvektiossa epäpuhtaudet kulkeutuvat sisäilmaan ilmavirtojen mukana ja diffuusiassa kaasumaisten yhdisteiden konsentraatioerot pyrkivät tasaantumaan kohti pienempiä pitoisuuksia. Rakenteiden ilmatiiviit rakennekerrokset estävät konvektiota ja vesihöyrytiiviit rakennekerrokset konvektion lisäksi diffuusiota. Konvektion mukana sisäilmaan kulkeutuu sekä hiukkasmaisia, että kaasumaisia epäpuhtauksia ja diffuusiolla pelkästään kaasumaisia epäpuhtauksia. Epäpuhtauksien kulkeutumiseen liittyvistä ilmiöistä konvektiota pidetään merkittävimpänä. (Lammi 2016.)

Rakenteiden painesuhteet vaikuttavat merkittävästi epäpuhtauksien kulkeutumiseen sisäilmaan. Rakennuksen ulko- ja sisävaipan välinen paine-ero vaikuttaa vuotoilmavirran suuntaan. Rakennuksen sisäpuolen ollessa huomattavasti alipaineinen, aiheutuu hallitsemattomia vuotoilmavirtoja rakenteiden läpi. Vuotoilmavirtauksien mukana rakenteista ja ulkoilmasta pääsee sisäilmaan kulkeutumaan epäpuhtauksia. Rakennuksen sisäpuolen ylipaineisuus puolestaan aiheuttaa riskin huoneilman kosteuden tiivistymisestä rakenteisiin. (Valvira 2016a.)

#### 3.2 Aikaisempia tutkimuksia epäpuhtauksien kulkeutumisesta

Aikaisempia tutkimuksia epäpuhtauksien kulkeutumisesta löytyy pääosin ulkomailla tehdyistä artikkeleista. Partikkeleiden kulkeutumisesta rakenteiden läpi on tehty tutkimuksia laboratorio- sekä kenttäolosuhteissa, minkä lisäksi partikkeleiden kulkeutumista on myös mallinnettu matemaattisin keinoin.

Liu ja Nazaroff (2003) tutkivat laboratorio-olosuhteissa 0,02–7 µm kokoisten partikkeleiden liikkumista halkaisijaltaan vähintään 0,25 ja 1 mm kokoisista raoista. Partikkelit olivat laboratoriossa tuotettuja, haihtumattomia sekä sähköisesti neutraaleja. He arvioivat

edellä mainittujen kokojen edustavan oikeissa rakennuksissa esiintyviä rakoja ja halkeamia. Pienempi raon koko edusti alarajaa, jonka läpi merkittävä osa hallitsemattomista ilmavuodoista pääsee kulkemaan. Tutkimusmateriaaleina käytettiin yleisiä rakennusmateriaaleja: alumiinia, tiiltä, betonia, vaneria, puulastulevyä ja punapuista sekä havuista sahatavaraa. Rakojen pituudet olivat 4,5 mm kaikille rakennusmateriaaleille lukuun ottamatta alumiinia, jolle rakojen pituudet olivat 4,3 mm ja 9 mm. Partikkeleita liikuttava voima tutkimuksessa oli tutkimuskammioon pumpulla aiheutettu alipaine. Partikkeleiden liikettä tutkittiin kahdella eri paine-eron suuruudella, jotka olivat 4 Pa ja 10 Pa. Tutkimuksessa havaittiin 0,02–7 µm kokoisten partikkeleiden pääsevän liikkumaan materiaalista riippumatta pääosin täydellisesti raosta, jonka halkaisija on vähintään 1 mm. Raon ollessa vähintään 0,25 mm, partikkelit, joiden halkaisija oli välillä 0,1–1 µm pääsivät myös liikkumaan raon läpi pääosin täydellisesti. Kyseisissä havainnoissa paine-ero raon eri puolilla oli vähintään 4 Pa. Tutkimuksissa havaittiin myös, että tulosten hajontaan vaikuttivat raot, joissa oli havaittavissa huomattavaa pintakarheutta tai epäsymmetristä raon geometriaa, kuten betonissa, puulastulevyssä ja luonnollisesti haljenneessa tiilessä. (Liu & Nazaroff 2003, s. 565–573.)

Liu ja Nazaroff (2001, s. 4461) päättelivät jo aikaisemmassa mallintamistutkimuksessaan, että suurempi raon koko (1 mm) edusti rajaa, jonka läpi partikkeleiden tunkeutuminen on suurta, riippumatta niiden halkaisijasta. Muita matemaattista mallintamista hyödyntäviä tutkimuksia ovat tehneet muun muassa Mosley et al. (2001) ja Popescu ja Limmam (2012).

Wang et al. (1997) tutkivat laboratorio-olosuhteissa halkeilleen betonin läpäisevyyttä, betonin vedenläpäisevyyden avulla. Tutkimuksissa halkeamien koon kasvaessa 50 µm:istä 200 µm:iin kasvoi myös betonin vedenläpäisevyys huomattavasti (Wang et al. 1997). Edellä mainitut tulokset betonin vedenläpäisevyyden huomattavasta kasvusta halkeamien koon lähestyessä 200 µm:iä, ovat lähellä Liun ja Nazaroffin (2003) tutkimuksessa käytettyä raon koon alarajaa (250 µm). Tutkimukset osoittavatkin, että kokoluokka 200 µm on oleellinen tutkittaessa erityisesti pienhiukkasten kulkeutumista rakenteiden läpi.

Kenttäolosuhteissa tehtyjä, eli niin sanottuja in situ -tutkimuksia ovat tehneet muun muassa Morey et al. (2002) sekä Li ja Chen (2003). Morey et al. (2002) tutkivat kahdessa rakennuksessa piilossa olevan homeen itiöiden kulkeutumista sisäilmaan, sekä tehostetun siivouksen merkitystä itiöiden kulkeutumiseen. He havaitsivat, että mikrobivaurioituneissa kohteissa ei havaita aina viitteitä mikrobeista sisäilmanäytteissä. Lisäksi he havaitsivat myös, että sisäilmanäytteissä, joissa löytyi viitteitä mikrobeista, ei havaittu kaikkia vaurioituneissa rakenteissa vallitsevia mikrobilajeja. (Morey et al. 2002.) Li ja Chen

(2003) ovat puolestaan tutkineet ilmanvaihtuvuuden merkitystä sisäilman ja ulkoilman partikkeleiden väliseen suhteeseen. He havaitsivat, että ilmanvaihtuvuuden lisääminen vähentää sisäilmalähteistä johtuvia epäpuhtauksia suhteessa ulkoilmasta johtuviin epäpuhtauksiin. (Li & Chen 2003.)

Morey et al. (2002) kanssa vastaavia tuloksia saivat myös Suomessa tehdyssä tutkimuksessaan Jalkanen et al. (2019), jotka tutkivat eri menetelmien ja näytetyyppien toimivuutta vaurio- ja vertailurakennusten erottamiseksi. He eivät kuitenkaan saaneet tutkimuksessaan eroteltua vaurio- ja vertailukohteita toisistaan käytetyillä menetelmillä. Menetelminään he käyttivät sisäilmanäytteistä viljelymenetelmää ja qPCR-menetelmää sekä lattiapölynäytteestä FERMI qPCR-menetelmää. (Jalkanen et al. 2019.)

Suomesta on tehty myös aihealueeseen liittyviä diplomitöitä. Esimerkiksi Weckström (2003) havaitsi diplomityössään, että kaasumaisessa olomuodossa olevat MVOC-yhdisteet pääsevät osittain kulkemaan diffuusiolla ehjän höyrynsulkumuovikalvon lävitse. Päckilä (2012) puolestaan tutki paine-eron vaikutusta mikrobien kulkeutumiseen ja havaitsi, että rakennuksen alipaineistus ei lisännyt merkittävästi sieni-itiöiden määrää sisäilmanäytteissä.

## 4. ILMATIIVEYS JA EPÄPUHTAUKSIEN KULKEUTUMINEN

### 4.1 Kuntotutkimukset

Kuntotutkimuksen laajuus ja tutkimuksen eteneminen riippuvat kohteen lähtökohdista. Kuntoarvio on pääosin rakenteita rikkomaton aistinvarainen arvio rakennuksen nykykunnosta, lisätutkimustarpeista sekä korjaustarpeista. Kuntotutkimus puolestaan tehdään sillä tarkkuudella, kuin rakenteiden todellisen kunnan, korjaustarpeiden ja -menetelmien määrittäminen edellyttää, eli rakenteita rikkovien menetelmien käyttö on yleensä tarpeen. Kosteus- ja sisäilmateknisessä kuntotutkimuksessa tutkitaan tarkasti kosteusvaurioituneeksi epäilty rakenteet, minkä lisäksi tutkitaan myös muut sisäilman laatuun vaikuttavat rakenneosat ja talotekniset tekijät. (Ympäristöopas 2016, s. 16–17)

Ympäristöoppaassa 2016 ”Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus” on kerrottu käytännön ohjeita kosteus- ja homevaurioituneiden tai muuten sisäilmaongelmaisten rakennusten kuntotutkimusten suunnittelusta, tekemisestä sekä tutkimustulosten analysoinnista ja raportoinnista. Kuntotutkimuksen kulku alkaa lähtötilanneselvityksellä ja tutkimussuunnitelman laatimisella. Lähtötiedoiksi kuntotutkimukselle koitetaan saada mahdollisimman kattavasti rakennekuvat, korjaushistoria, aiemmat vauriot, tiedossa olevat ongelmat, viat ja korjaustarpeet, aiemmat tutkimukset sekä käyttäjäkyselyt ja haastattelut. Kattavat lähtötiedot auttavat keskittämään tutkimuksia kenttätutkimusvaiheessa todennäköisimpiin ongelmakohtiin. Kenttätutkimuksissa selvitetään riittävällä otannalla rakenteiden kuntoa rakenneavauksin, mittauksin ja näytteenotoin. Kenttätutkimuksissa otetut näytteet analysoidaan laboratoriossa ja tulokset raportoidaan yhdessä lähtötietojen, kenttätutkimusten tulosten ja havaintojen kanssa. Raportoinnissa yhteenvedon, johtopäätösten ja toimenpide-ehdotusten lisäksi voidaan myös arvioida tilankäyttäjien altistumista. Altistumisen arviointi on yksi osa rakennusten korjausten kiireellisyyden arviointia. (Ympäristöopas 2016.) Seuraavissa kappaleissa olen esitellyt tärkeimpiä ympäristöoppaastakin löytyviä menetelmiä rakenteiden tiiveyden ja epäpuhtauksien kulkeutumisen tutkimiseksi.

### 4.2 Painesuhteiden mittaus

Epäpuhtauksien kulkeutumisen arvioinnissa on aina oleellista mitata rakenteen ulkovai-  
pan yli vallitsevat painesuhteet. Painesuhteet vaikuttavat suoraan ilmavuotomääriin ja

näin myös mahdollisten epäpuhtauksien kulkeutumiseen. Painesuhteet tulisi mitata vähintään 1–2 viikkoa kestäväällä pitkäaikaismittauksella, jotta yleisesti vallitsevat painesuhteet saadaan mahdollisimman hyvin esille. (Ympäristöopas 2016, s. 32) Lyhyessä mittauksessa painesuhteet voivat olla kunnossa, mutta tilojen käyttöaikojen ulkopuolella ilmanvaihdon ollessa kiinni tai jaksottaisella käytöllä voi tiloissa esiintyä erillispoistojen takia huomattavaakin alipainetta (Tuomainen et al. 2019).

Koko rakennuksen ilmapuutoriskien arvioimista varten paine-erot tulee mitata mahdollisimman laajasti ilmanvaihtojärjestelmän eri palvelualueilta, eri kerroksista ja eri ilman-suunnista. Paine-erojen suuruuteen vaikuttaa ilmanvaihdon lisäksi merkittävästi tuuliolosuhteet, lämpötilaerot, luonnollinen savupiippuvaikutus sekä tilojen käyttö. (Ympäristöopas 2016, s. 32, 118–123.)

### 4.3 Merkkiainekoe

Merkkiainekokeella voidaan selvittää tarkasti rakenteiden ilmapuutokohtia ja siten myös arvioida epäpuhtauksien leviämistä rakenteiden kautta sisäilmaan. Lisäksi merkkiainekokeita voidaan soveltaa esimerkiksi hajuhaittaselvityksissä, radontutkimuksissa, viemäreiden tiiveysmittauksissa, IV-kanavistojen tiiveysmittauksissa, savuhormien tiiveyden tutkimisessa, ilmanvaihdon ilmavirtausten tutkimisessa sekä ilmarakojen ja tuuletusvälien toimivuuden selvittämisessä. (RT 14-11197, 2015.)

Merkkiainekokeessa tutkittavan rakenteen sisälle päästetään merkkiainekaasua rakenteeseen poratusta reiästä tai muusta rakenteen sisälle kulkeutuvasta raosta, esimerkiksi julkisivun tuuletusraosta. Merkkiainekaasu leviää tutkitussa rakenteessa sekä konvektiolla ja että diffuusiolla. Yleisimmät käytetyt merkkiainekaasut ovat typpi-vety-seos sekä rikkiheksafluoridi. Tutkittavan rakenteen huonetilan tulee olla riittävän alipaineinen, jolloin ilmavirtauksen ja merkkiaineen suunta on rakenteesta huonetilaan päin. Tutkittava alue voidaan tarvittaessa osastoida ja alipaineistaa alipaineistajalla. Suositeltu tutkittavan tilan alipaine laadunvarmistusmittauksissa on välillä -10...-15 Pa. Merkkiaineen vuotokohdat havaitaan merkkiaineanalyysointia avulla. (RT 14-11197, 2015.) Merkkiainekokeen tulos on dikotominen, eli vuotoa joko on tai vuotoa ei ole. Merkkiainekokeissa merkkiaineanalyysointia herkkyyttä sekä merkkiaineen määrää voidaan säätää, joten tutkijan ammattitaidolla ja kokemuksella on suuri merkitys tulosten tulkinnan kannalta.

Kuvassa 1 on havainnollistettu merkkiainekokeen suorittamista. Kuvassa on nähtävissä merkkiainepistooli, jolla merkkiainetta on syötetty rakenteeseen ja merkkiaineanalysaattorin mittapää, jolla vuotoa on etsitty. Merkkiaineanalysaattorilla havaittu vuoto on merkitty kuvassa oranssilla teipillä.



**Kuva 1.** Esimerkkikuva merkkiainekokeen suorituksesta (Dimen Oy)

#### 4.4 Merkki- ja puhdassavututkimukset

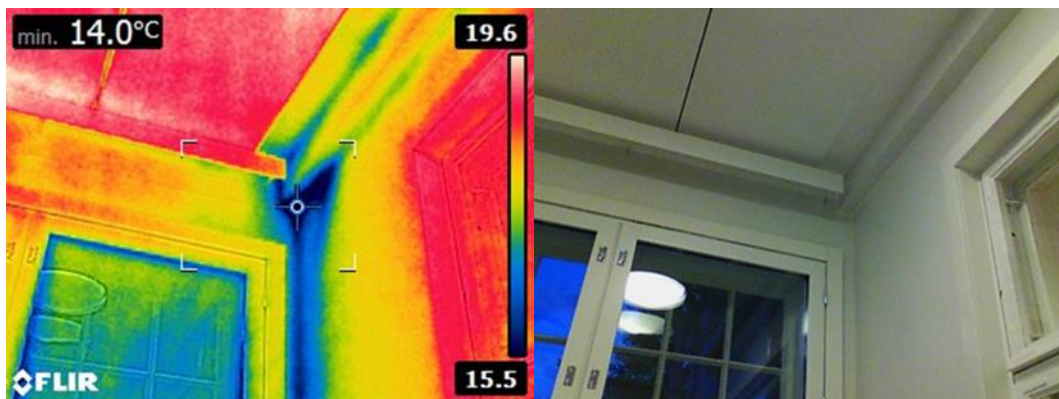
Ilmanvuotoa sekä ilman virtauksen voimakkuutta ja suuntaa voidaan määrittää aistinvaraisten havaintojen tukena merkkisavun avulla. Merkkisavu käytetään yleensä rikkihappoa, joka muodostaa sisäilman kosteuden vaikutuksesta näkyvää savua. Merkkisavua voidaan käyttää pienialaisissa tutkimuksissa esimerkiksi rakenteiden liitoskohtien lähellä. (Ympäristöopas 2016, s. 60–61.)

Puhdassavuna käytetään yleensä haitatonta glykolipohjaista savua. Puhdassavua voidaan myös käyttää hyväksi suurten tilojen ilmatiiveyden tutkimisessa. Savukokeessa tutkittavaan rakenteeseen lasketaan savukoneen avulla paksua, tiivistä savua. Tutkimuksissa tutkittava huonetila voidaan tarvittaessa alipaineistaa, jolloin savu pyrkii kulkeutumaan ilmanvuotojen kautta kohti huonetilaa. (Ympäristöopas 2016, s. 60–61.) Savututkimukset perustuvat aistinvaraisiin havaintoihin ja niitä voidaan käyttää muiden tutkimusmenetelmien tukena.

## 4.5 Lämpökuvaus

Lämpökuvaus tarkoittaa pinnan lämpötilajakauman määrittämistä ja kuvaamista lämpökameralla. Lämpökamera mittaa kuvauskohteen pinnasta lähtevän lämpösäteilyn eli infrapunasäteilyn voimakkuutta. Lämpökamera muuttaa kohteesta tulevan lämpösäteilyn lämpötilatiedoksi ja muodostaa digitaalisen lämpökuvan. Lämpökamerakuvauksissa huonelämpötilan ja ulkolämpötilan lämpötilaerojen on oltava riittävän suuret kuvakseen onnistumiseksi. Lämpötilaeron vähimmäisvaatimukset vaihtelevat tutkimuksen luonteen ja kameran ominaisuuksien mukaan. (RT 14-11239, 2016.)

Lämpökamerakuvauksia voidaan hyödyntää tutkittaessa epäpuhtauksien kulkeutumista. Lämpökamerakuvaksilla pystytään löytämään mahdollisia sisätiloihin tulevia ilmavuotoja, joista sisäilmaan epäillään tulevan epäpuhtauksia. Tutkittujen rakenneseosien tulee olla kuvauksen aikana alipaineiset, jotta ilmavuodot voidaan havaita. Lämpökameralla voidaan myös tarkastella muun muassa ulkovaipan lämpöteknistä kuntoa, lämmöneristyskerroksen toimivuutta, rakenteiden fysikaalista toimintaa sekä tietyissä tapauksissa kosteusvaurioita. (RT 14-11239, 2016.) Alla olevassa kuvassa 2 on esitetty esimerkkikuva lämpökuvauksesta.



**Kuva 2.** Lämpökuvauksella voidaan paikantaa rakenteissa olevia ilmavuotokohtia. Kuvassa tarkastellaan ikkunarakenteen ja ulkoseinän nurkan vuotokohtia. (Dimen Oy)



## 4.6 Ilmavuotoluku

### 4.6.1 Rakennuksen ilmavuotoluvun määrittäminen

Teollisesti valmistettujen sekä myös muilla vakioituilla rakenteilla ja toteutustavoilla tehtyjen rakennuksien ilmanpitävyyden laadunvarmistus voidaan tehdä ilmavuotoluvun ilmoitusmenettelyllä. Ilmavuotoluku  $n_{50}$  kertoo, kuinka monta kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnissa rakennusvaipan vuotoreittien kautta, kun rakennukseen on aiheutettu 50 Pa ali- tai ylipaine. Ilmavuotoluvulla kuvataan rakennusvaipan ilmanpitävyyttä. (RT 80-10974, 2009.)

Ilmavuotoluvun mittaamista varten rakennuksen ilmanvaihtoa varten tehdyt aukot, hormit ja tulisijat tulee olla suljettuna tiiviisti, minkä lisäksi myös ovet ja ikkunat tulee olla suljettuna mittaamisen aikana. Ilmavuotoluku mitataan sitä varten tehdyllä painekoelaitteistolla, mutta mittaus voidaan myös suorittaa rakennuksen omilla ilmanvaihtolaitteistoilla. Painekekeessa määritetään ilman tilavuusvirta, joka puhalletaan rakennukseen tai sieltä pois, jotta saadaan haluttu paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli. Paine-eroihin tarvittavat ilmavirrat määritetään portaittain vähintään 50 Pa paine-eroon asti. (RT 80-10974, 2009.)

Ilmanvuoto luku  $n_{50}$  voidaan laskea RT 80-10974 mukaisesti kaavalla 1:

$$n_{50} = \frac{V^i}{V}, \quad (1)$$

missä  $V^i$  on ilman tilavuusvirta kuutiometreinä tunnissa, mikä tarvitaan 50 Pa:n paineeron saavuttamiseksi rakennuksen ulkovaipan yli ja  $V$  on rakennuksen sisätilavuus kuutiometreinä.

Rakennuksen ilmavuotoluku voidaan myös määrittää vaipanpinta-alaa kohti  $q_{50}$ -lukuna RT 80-10974 mukaisesti kaavalla 2:

$$q_{50} = n_{50} \times \frac{V}{A_E}, \quad (2)$$

missä  $A_E$  on vaipan pinta-ala neliömetreinä sisämittojen mukaan laskettuna.

Ilmavuotoluvun mittaus on suositeltavaa tehdä siinä vaiheessa rakentamista, kun kaikki ilmanpitävyyteen vaikuttavat rakennustyöt on ulkovaipan osalta tehty valmiiksi, mutta li-sätiivistämistä on vielä mahdollista suorittaa. Ilmavuotoluvun mittaamisen yhteydessä

vuotoreittejä on mahdollista paikantaa esimerkiksi lämpökameran avulla alipaineko-  
keessa ja merkkisavun avulla ylipainekokeessa, jotta ilmavuotoreitit saadaan tiivistettyä  
välittömästi. (RT 80-10974, 2009.)

#### 4.6.2 Ilmavuotoluvun kehittyminen

Rakenteiden energiatehokkuuteen ja tiiveyteen ei ole aina kiinnitetty yhtä paljon huo-  
miota kuin nykypäivänä. Ympäristöministeriön (2017) asetuksen (1010/2017) mukaan  
rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku ( $q_{50}$ ) tulee olla enintään  $4,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ . Ilmanvuoto-  
luku voi kuitenkin ylittää edellä mainitun arvon, jos rakennuksen käytön vaatimat raken-  
teelliset ratkaisut sitä edellyttävät (Ympäristöministeriö 2017). Sisäilmaluokituksen  
(2018) mukaan sisäilmaluokissa S1 ja S2 ilmanvuotoluvun ( $q_{50}$ ) tavoitearvona on olla  
alle  $1 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$  (RT 07-11299).

Aikaisemmissa tutkimuksissa on käytetty ilmavuotolukuna  $n_{50}$  muotoa, jossa ilmavuotoja  
ulkovaipaneliöiden sijasta verrataan rakennuksen ilmatilavuuteen. Kronvallin ja Bo-  
manin (1993b) mukaan esimerkiksi Ruotsin rakennuskannassa ennen 1940-lukua ra-  
kennettujen rakennusten ilmavuotoluvut ( $n_{50}$ ) ovat olleet pientalojen osalta noin 10 1/h ja  
kerrostalojen osalta noin 8-9 1/h. Tutkimuksen mukaan ilmavuotoluvut ovat laskeneet  
vuosikymmenten aikana, ja 1980-luvun taitteessa mitatut arvot ovat olleet kerrostalojen  
osalta noin 1-2 1/h ja pientalojen osalta 4-5 1/h. (Säteri et al. 1999.)

Vinhan et al. (2005) tutkimuksen mukaan myös Suomessa uudemmat talot vaikuttivat  
olevan vanhempia taloja tiiviimpiä. Tutkimuksessa havaittiin eroja ilmanvuotoluvuissa  
( $n_{50}$ ) myös esimerkiksi rakennustavan ja ilmanvaihtojärjestelmän vaikutuksesta. (Vinha  
et al. 2005.)

Vinha et al. (2010) pyrkivät myöhemmässä tutkimuksessaan saamaan parempaa käsi-  
tystä suomalaisten pientalojen ja kerrostalojen ilmanpitävyyden tasosta. Mittauksia teh-  
tiin kivi- ja hirsirakenteisiin pientaloihin sekä betoni- ja puurakenteisiin kerrostaloihin.  
Kohteet olivat tutkimuksen ajankohtana uudehkoja. Pienimmät  $n_{50}$ -lukujen keskiarvot oli-  
vat betonisilla paikallavaluvälipohjaisilla kerrostaloilla 0,7 1/h ja suurimmat hirsitaloilla  
6,0 1/h. Erot eri talotyyppien välillä tasoittuivat hieman, kun vertailut tehtiin  $q_{50}$ -luvulla.  
Esimerkiksi hirsitalojen  $q_{50}$ -luvun keskiarvo oli  $5,7 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ . (Vinha et al. 2010.)

Vinhan et al. (2010) tutkimuksen mukaan vaipan ilmavuotoluku vaikuttaa myös raken-  
nuksen paine-erosuhteiden hallintaan. Tutkimusten mukaan ilmavuotoluvun tulisi olla  
alle 0,4 1/h, että ilmanvaihdon säätäminen vaikuttaisi merkittävästi paine-erosuhteisiin.

Ilmavuotoluvun tuli olla alle 2,0 1/h, jotta ilmanvaihdon säätämisellä olisi merkitystä. Tutkimuksessa todetaan, että havaintojen perusteella tavoitearvon tulisi olla alle 1,0 1/h, jotta paine-eroja voidaan säätää hallitusti. (Vinha et al. 2010.)

## 5. TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTO

Tutkimuksen aineistona on Dimen Oy:n tekemiä sisäilma- ja kuntotutkimusraportteja todellisista kohteista. Raportit on tässä opinnäytetyössä käsitelty anonymistisesti ja nimetty tunnuksilla *Case 1-5*.

Tutkimuksen kohteina olevat rakennukset ovat kouluja ja päiväkoteja. Aineiston raporteista esittelen kohteen yleistietoja pääpiirteittäin, mutta kuitenkin kohteen anonymiteetin säilyttäen. Tarkastelen raporteista erityisesti sitä, kuinka niissä on käsitelty epäpuhtauksien kulkeutumista ja rakennuksien ilmatiiveyttä. Alla olevassa taulukossa 1 on esitelty case-kohteiden perustiedot.

**Taulukko 1.** Tutkimusaineistona käytettyjen sisäilma- ja kuntotutkimusraporttien perustiedot.

	Käyttötarkoitus	Rakennusajankohta	Pääasiallinen rakennusmateriaali	Kerrosluku	Ilmanvaihtotapa
Case 1	Koulu	1910-luku	Tiili	4	koneellinen tulo-poisto
Case 2	Päiväkoti	1970-luku	Puu ja betoni	1	koneellinen tulo-poisto
Case 3	Koulu	1960-luku	Betoni	3	koneellinen poisto tai tulo-poisto
Case 4	Koulu	1980-luku	Betoni	1	koneellinen tulo-poisto
Case 5	Päiväkoti	1980-luku	Betoni	1	koneellinen tulo-poisto

## 6. SISÄILMA- JA KUNTOTUTKIMUSTEN RAPORTTIEN TARKASTELUA

### 6.1 Case-kohteet

#### 6.1.1 Case 1

##### *Kohteen esittely:*

Case 1 oli epäillyn sisäilmaongelman tutkiminen koulurakennuksessa. Rakennuksessa oli koettu oireilua, jonka epäiltiin liittyvän rakennuksen sisäilmaan. Koululle oli jo aikaisemmin perustettu sisäilmatyöryhmä, minkä jälkeen rakennuksessa on tehty useita toimenpiteitä ja tutkimuksia. Aikaisemmat toimenpiteet ja tutkimukset ovat pohjautuneet havaittuihin puutteisiin ilmanvaihdossa sekä 1. kerroksen alapohjan ja ulkoseinien kosteusteknisessä toimivuudessa. Tehtyjen toimenpiteidenkin jälkeen tiloissa oli esiintynyt oireilua, jonka epäiltiin liittyvän sisäilmaan ja kohteella päätettiin tehdä laajempi kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus kattamaan aiemmin tutkittujen osien lisäksi koko rakennus.

Kohde on 1910-luvulla valmistunut monikerroksinen tiilirakennus. Rakennuksen ulkoseinät ovat massiivista tiiliseinää ja välipohjat eristettyä betonista alalaattapalkistoa. Alapohja on maanvarainen laatta. Vesikatteenä on tiilikate.

##### *Kohteessa havaitut epäpuhtauslähteet:*

Kohteen välipohjissa havaittiin materiaalinäytteiden mikrobianalyysin sekä aistinvaraisen havaintojen perusteella mikrobivaurioituneita materiaaleja (pellavaeriste sekä yhdessä kohdassa muottilaudoitusta), minkä lisäksi jalkalistan alta havaittiin aistinvaraisesti tulevan paikoin myös liiman hajua. VOC-mittauksissa välipohjan materiaaleista havaittiin erityisesti vanhassa mattoliimassa olevan suuria VOC-pitoisuuksia.

Rakennuksen ulkoseinärakenteena on massiivinen tiiliseinä, mutta patterisyyvennysten kohdalla tiiliseinän sisällä n. 100 mm etäisyydellä pinnasta on käytetty lisäeristeenä 30–40 mm paksuista korkkilevyä. Korkkilevyistä otetuissa materiaalinäytteissä havaittiin myös mikrobivaurioita.

Rakennuksen kellarin putkikanaaliin johtava ovi havaittiin olevan huonosti kiinni ja epätiivis. Kohteessa otettiin myös PAH-näytteitä, joista toimenpiderajat ylittyivät välipohjan koolauspuiden välisestä bitumihuovasta/tervapaperista otetussa näytteessä. Lisäksi

kohteessa otetuissa pyyhintänäytteissä pölynkoostumuksen arvioimiseksi havaittiin vähäisiä määriä rakennuspölyä sekä mineraalikuituja.

### ***Epäpuhtauksien kulkeutumisen arviointi:***

Välipohjan eristetilasta oli tutkimuksessa aistinvaraisesti havaittu ilmayhteyksiä sisäilmaan ulkoseinäliittymien, putkiläpivientien ja rakennuksessa kulkevien pystysuuntaisten kipsilevykotelointien kautta. Tutkimuksessa oli arvioitu altistumisolosuhteet välipohjan epäpuhtauksille todennäköisiksi, mikäli painesuhteet tilan ja eristetilän välillä ovat sellaiset, että ilmapvirtaus on eristetilasta sisäilmaan päin. Painesuhteidenmittausta kyseisen rakenteen yli ei tutkimuksessa tehty.

Putkikanaaliin oli suoritettu paine-eromittaukset, joiden perusteella putkikanaalin ilma kulkeutuu sisäilmaan päin. Putkikanaalin hajua oli myös aistinvaraisesti havaittu kellarissa.

Ulkoseinän korkissa havaittujen vaurioiden osalta altistuminen arvioitiin mahdolliseksi esimerkiksi ikkunaliitosten epätiiveyskohtien kautta, mikäli paine-erot tilassa ovat alipaineiset ulkoilmaan nähden. Tutkimuksen raportissa mainittiin, että aiemmassa tutkimuksessa ulkovaipan yli tehdyissä painesuhdemittauksissa rakennuksen sisäpuoli oli alipaineinen ulkoilmaan nähden.

## **6.1.2 Case 2**

### ***Kohteen esittely:***

Case 2 oli epäillyn sisäilmaongelman tutkiminen päiväkodissa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää päiväkodin tiloissa epäillyn sisäilmaongelman sekä hajuhaittojen aiheuttajia. Kohde on 1970-luvulla valmistunut 1-kerroksinen rakennus.

Rakennus on perustettu maanvaraisin anturoin ja sen sokkelipalkit ovat betonielementtirakenteiset. Sokkeli on osittain maanvastainen. Rakennuksen alapohja on pääosin maanvastainen betonilaatta, mutta päiväkodin länsipäädyssä alapohja on betonirakenne kaksoislaatta, jonka alla on ryömintätila. Rakennus on pilaripalkkirunkoinen, ja sen ulkoseinät ovat osin puurunkoiset ja osin betonielementtiä. Yläpohjana on kevytbetonielementeistä tehty tasakattorakenne sisäpuolisella sadevesiviemäröinnillä. Rakennukseen on 2000-luvulla tehty lisäeristystä sekä yläpohjaan että ulkoseiniin. Tiloissa on koneellinen tulo-poisto-ilmanvaihto.

### ***Kohteessa havaitut epäpuhtauslähteet:***

Rakennuksesta otettujen materiaalinäytteiden mikrobianalyysissä havaittiin viitteitä vaurioista keittiön kylmiön mineraalivillaeristeessä sekä alapohjan tekniikkakanaalin muottilaudoituksessa. Lisäksi kylmiön tarkastuksessa sekä tekniikkakanaaliin tehdyssä tarkastusporauksessa havaittiin vahvaa mikrobiperäistä hajua. Myös tuulettumattoman ryömintätilaisen alapohjan rakenneporauksessa havaittiin aistinvaraisesti selvää mikrobiperäistä hajua ja todennäköisesti vaurioitunutta orgaanista materiaalia.

Myös maanvastaisten seinien alaosien porauksissa havaittiin mikrobiperäistä hajua ja eristeen ulkopinnasta otetussa näytteessä oli heikko viite vauriosta, mutta saman kohdan sisäpinnasta otetussa näytteessä ei ollut viitettä vauriosta. Seinän eristettä ei pidetty tutkimuksessa mikrobivaurioituneena, sillä eriste oli suoraan tekemisissä ulkoilman kanssa, milloin mikrobien löytyminen materiaalista on normaalia. Osassa rakennusta muovimaton alta mitatut korkeat kosteuspitoisuudet ylittävät liimojen ja mattojen vaurioitumisen kannalta kriittiset rajat.

Alakattojen päällä oli havaittu muutamia suojaamattomia mineraalivillapintoja. Pyyhintänäytteissä pölynkoostumuksen arvioimiseksi kolmesta näytteessä neljästä löytyi vähäisiä määriä teollisia mineraalikuituja.

### ***Epäpuhtauksien kulkeutumisen arviointi:***

Kylmiössä havaittiin aistinvaraisten havaintojen sekä materiaalinäytteen perusteella mikrobivaurioitunutta eristemateriaalia. Kylmiön eriste on peltilevyn ja alumiinipaperin takana ja ilmayhteys kylmiön sisäilmaan on mahdollinen etenkin liitoskohdista.

Rakennuksen keittiön varastotiloissa oli aistittavissa mikrobiperäinen haju. Mikrobiperäisen hajun lähteeksi osoittautui alapohjassa kulkeva tekniikkakanaali. Tilojen alla kulkevan tekniikkakanaalin ja sisäilman välinen paine-eromittaus osoitti sisäilman olevan alipaineinen kanaaliin nähden, joten tekniikkakanaalin ”likainen” ilma kulkeutuu sisäilmaan päin.

Rakennuksen tuulettumattomassa ryömintätilaisessa alapohjassa havaittiin aistinvaraisesti orgaanista todennäköisesti vaurioitunutta materiaalia rakenteissa ja voimakasta mikrobiperäistä hajua. Ryömintätilassa havaittiin merkkiainemittausten perusteella ilmayhteys ryömintätilasta sisäilmaan päin ja paine-eromittausten perusteella sisäilma on suuren osan ajasta alipaineinen ryömintätilaan nähden, joten ilman kulku on pääosin ryömintätilasta sisäilmaan päin.

Merkkiainekoe oli suoritettu yhdestä kohdasta päästämällä merkkiainetta ryömintätilaan alapohjaan ja tarkastelemalla lähellä olevia liittymäkohtia. Ryömintätilaisen alapohjan rakenne on kaksoisbetonilaatta EPS eristyksellä ja ulkoseinän rakenne tarkastelussa kohdassa sisältä ulospäin seuraava: kipsilevy, höyrynsulkumuovi, puurunko ja mineraalivilla, tuulensuojalevy sekä puuverhoilu. Merkkiainekokeessa ilmavuotoja havaittiin ryömintätilasta huonetilaan nurkkapilarin, alapohjan ja ulkoseinän liittymäkohdassa, sekä alapohja ja ulkoseinäliittymässä.

Kuvassa 3 on esitetty merkkiainekokeen suoritus ja havainnointi. Vuotokohdat on esitetty kuvassa punaisilla nuolilla. Vuodot voisi kuvan perusteella tulkita pistemäisiksi, mutta testaushetkellä liittymässä oli kuitenkin muovinen jalkalista paikallaan, joka voi osaltaan vaikuttaa liittymän kautta tulevan merkkiaineen havaitsemiseen. Tutkimuksissa oli havaittu ulkoseinän ja alapohjan liittymässä jalkalistan irrottamisen jälkeen selvä rako, jonka perusteella voisi arvioida vuotoreittejä olevan kyseessä olevassa rakenneliittymästä merkittävässä määrin. Pilarin liittymäkohdasta ei löytynyt raportista tarkempia havaintoja.



**Kuva 3.** Merkkiainekokeen suoritus ja vuotokohtien merkinnät (Dimen Oy case 2)

### 6.1.3 Case 3

#### **Kohteen esittely:**

Case 3 oli sisäilma- ja kosteustekninen kuntotutkimus koulurakennuksesta. Rakennuksen käyttäjät olivat täyttäneet sisäympäristön havaintolomakkeet, joiden perusteella kohteessa oli jo havaittavissa useita sisäilmaongelmiin viittavia asioita.

Koulu on rakennettu kahdessa osassa. Koulun vanhempi osa on rakennettu 1960-luvulla ja laajennusosa 1970-luvulla. Rakennuksessa on kolme kerrosta ja rakennus sijaitsee rinteessä siten, että alin kellarikerros on osittain maanpinnan alapuolella.



Rakennuksessa on pilari-palkkirunko ja välipohjat ovat vanhalla osalla paikalla valettuja ylälaattapalkistoja ja uudella osalla välipohjarakenteena on ontelolaatta. Ulkoseinät ovat sekä uudella että vanhalla osalla pesubetonipintaisia sandwich-elementtejä. Yläpohjarakenne on pääasiassa betonirakenteinen yläpuolisella tuuletustilalla. Vesikatteenä on bitumikermi. Salin yläpohja on siporex-rakenteinen (ei yläpuolista tuuletustilaa). Rakennuksen laajennusosassa on koneellinen tulo-poistoilmanvaihto ja vanhemmassa osassa pääosin pelkkä koneellinen poistoilmanvaihto. Osaa vanhemman puolen tiloista palvelee myös omat tulokoneet.

### ***Kohteessa havaitut epäpuhtauslähteet:***

Maanvastaisissa seinärakenteissa havaittiin kosteusmittausten ja materiaalinäytteiden mikrobianalyysin perusteella laaja-alaista kosteus- ja mikrobivaurioitumista. Alapohjarakenteissa havaittiin viitteitä maakosteuden noususta ja siitä aiheutuneesta lattiapinnoitteiden todennäköisistä vauriosta. Rakennuksen alapohjassa kulkee tekniikkakanaali, jossa oli havaittu epätiiveyskohtia.

Ulkoseinärakenteiden eristetilassa havaittiin kohonneita kosteuspitoisuuksia sekä rakennuksen vanhassa osassa että laajennusosassa. Ulkoseinien eristeessä havaittiin materiaalinäytteiden perusteella mikrobivaurioita. Ikkunoissa havaittiin aistinvaraisesti ja materiaalinäytteiden perusteella kosteus- ja mikrobivaurioita karmeissa, listoissa ja karmi-tiivistyksissä.

Rakennuksessa havaittiin myös mahdollisia mineraalivillalähteitä, joita olivat muun muassa akustiikkalevyt, alakattojen metallikasettirakenteiden mineraalivillalähteet ja tuloilmajärjestelmän mineraalivillalähteet. Kohteessa oli otettu pyyhintänäytteitä pölynkoostumuksen arvioimiseksi. Kaikista tuloilmakanavista sekä pinnoilta otetuista näytteistä löytyi vaihtelevin määrin rakennuspölyä. Myös yhdestä tuloilmakanavan näytteestä löytyi kohdallaisesti teollisia mineraalikuituja ja yhdestä pintanäytteestä vähäisiä määriä teollisia mineraalikuituja. Kohteesta otettiin myös mineraalivillakuitunäytteitä geeliteippimenetelmällä kuitujen tarkemmaksi arvioimiseksi, mutta tuloksissa ei havaittu toimenpiderajat ylittäviä arvoja. Kohteessa tutkittiin myös PAH- ja VOC-yhdisteitä sekä asbestin esiintymistä, mutta kyseisissä tutkimuksissa toimenpiderajat eivät ylittyneet.

### ***Epäpuhtauksien kulkeutumisen arviointi:***

Tiloista oli tehty paine-ero mittauksia ulkovaipan yli kaikista kerroksista ja ilman suunnasta sekä kaikilta eri ilmanvaihtolaitteiden vaikutusalueilta. Rakennuksen painesuhteet

ovat vanhalla osalla koneellisen poistoilmanvaihdon takia merkittävästi alipaineiset. Alipaine lisää rakenteellisia ilmavuotoja ja siten rakenteissa olevien epäpuhtauksien kulkeutumista sisäilmaan. Alipaineisuutta havaittiin myös rakennuksen laajennusosassa koneellisen tulo-poistoilmanvaihtojärjestelmän alueella.

Tekniikkakanaalista havaittiin silmämääräisesti selviä epätiiveyskohtia sekä sieltä aistinvaraisesti leviävää maakellarimaista hajua. Paine-eromittauksissa tekniikkakanaali oli havaittu hieman ylipaineiseksi sisäilmaan nähden, eli ilman liikesuunta oli sisäilmaan päin.

Kohteen seinärakenteiden eristetiloista oli merkkiainekokeilla todettu ilmayhteyksiä sisäilmaan. Merkkiainekokeita oli suoritettu yhteensä 5 kappaletta. Merkkiainekokeet suoritettiin kaikissa viidessä kohdassa päästämällä merkkiainetta ulkoseinän eristetilaan ja tarkastelemalla lähellä olevia liittymäkohtia. Merkkiainekokeet oli suoritettu rakennuksessa kussakin osassa tyypillisessä paine-erossa.

Ylälaattapalkistoisen välipohjan ja päätyseinien kantavien sandwich-elementtien liittymäkohdista havaittiin kahdessa merkkiainekokeessa kuvien 4 ja 5 mukaisesti merkittävää vuotoa. Paine-ero ulkovaipan yli oli kuvan 4 merkkiainekokeessa noin  $-1...-3$  Pa ja kuvan 5 merkkiainekokeessa  $-20$  Pa sisäpuolen ollessa molemmissa alipaineinen. Tarkastelukohdista vuotoa havaittiin noin yhden metrin säteeltä. Vuodot kohdissa johtuvat todennäköisesti paikalla valetun betonilaatan kuivumiskutistumasta ja tiivistämättömistä liittymistä. Kuvan 4 merkkiainekokeen kohdassa muovinen jalkalista oli osittain poistettu, jolloin vuotoa voidaan havaita merkittävänä kyseiseltä alueelta. Kuvan 5 esittämän rakenteen merkkiainekokeessa vuotoa voidaan havaita merkittävänä, vaikka jalkalista oli kuvan mukaan paikoillaan.



**Kuva 4.** Välipohjan ja päätyseinän liittymäkohdan merkkiainekokeen suoritus ja vuotokohtien merkinnät (Dimen Oy case 3)

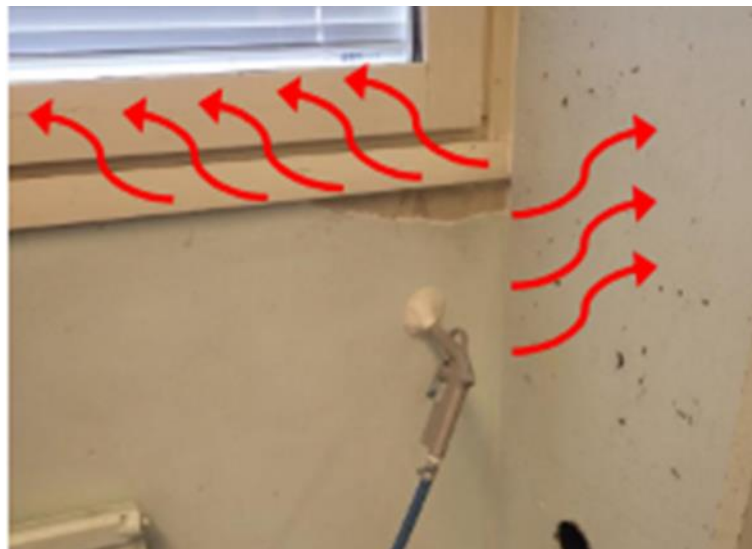


**Kuva 5.** Välipohjan ja päätyseinän liittymäkohdan merkkiainekokeen suoritus ja vuotokohtien merkinnät. Kuvassa sinisellä nuolella merkittynä merkkiaineen syöttökohta rakenteeseen. (Dimen Oy case 3)

Ikkunallisiin sandwich-elementteihin tehdyt merkkiainekokeet oli suoritettu sekä ontelo-laattaisen välipohjan sekä ylälaattapalkistaisen välipohjan alueelta läheltä pilari- ja ikkunaliittymiä. Näissä vuotoja todettiin kuvien 6 ja 7 perusteella merkittävinä pilariliittymässä sekä ikkunaliittymässä paine-eron ollessa ulkovaipan yli molemmissa merkkiainekoikeissa noin -1...-3 Pa sisäpuolen ollessa alipaineinen. Välipohjien sekä ikkunallisten ulkoseinien liittymistä ei ollut raportissa havaintoja.



**Kuva 6.** Ylälaattapalkistoisen välipohjan alueella ikkunallisen sandwich-elementin merkkiainekokeen suoritus ja vuotokohtien merkinnät (Dimen Oy case 3)



**Kuva 7.** Ontelolaattaisen välipohjan alueella ikkunallisen sandwich-elementin merkkiainekokeen suoritus ja vuotokohtien merkinnät (Dimen Oy case 3)

Maanvastaiseen ulkoseinään tehdyssä merkkiainekokeessa vuotoja havaittiin kuvan 8 perusteella pistemäisinä ikkunaliittymästä paine-eron ollessa ulkovaipan yli noin -10 Pa sisäpuolen ollessa alipaineinen. Vuodot puisen ikkunalistan takaa voisi kuitenkin tulkita merkittäviksi siinä määrin, että vuotoreittejä vaurioituneista rakenteista on olemassa ja vaurioiden laajuus rakenteissa on ollut huomattavaa. Lisäksi vastaavat ikkunalistat eivät välttämättä ole yhtä tiiviitä kaikkialla vastaavissa rakenteissa, kuten oli havaittavissa ylempien kerrosten kuvien 6 ja 7 tapauksissa.



**Kuva 8.** Maanvastaisen ulkoseinän merkkiainekokeen suoritus ja vuotokohtien merkinnät (Dimen Oy case 3)

#### 6.1.4 Case 4

##### **Kohteen esittely:**

Case 4 oli epäillyn sisäilmaongelman tutkiminen 1980-luvulla rakennetusta koulurakennuksesta, johon on tehty laajennusosa 1990-luvulla. Rakennuksessa oli epäilty sisäilmaongelmia ja käyttäjiltä saatujen tietojen mukaan sisäilma oli koettu välillä huonoksi (mm. hajuja ja tunkkaisuutta), minkä lisäksi osalla käyttäjistä epäiltiin olevan sisäilmaongelman aiheuttamia oireita.

Rakennus on yksikerroksinen. Rakennuksen kantava runko koostuu pilareista ja palkeista sekä kantavista väliseinä- ja ulkoseinälinjoista. Ulkoseinät ovat betonisia tiililaatatapintaisia sandwich-elementtejä ja kantavat väliseinät ovat betonielementtirakenteisia. Rakennuksessa on alapohjarakenteena maanvarainen teräsbetoni-laatta. Yläpohjarakenteena on ontelolaatasto. Vesikaton puiset kattokannattajat on tuettu ontelolaataston päälle ja yläpohjarakenne on tuulettuva. Rakennuksessa on loiva aumakatto, johon on uusittu bitumikermikate 2010-luvulla. Rakennuksessa on koneellinen tulo-poistoilmanvaihto.

### ***Kohteessa havaitut epäpuhtauslähteet:***

Rakennuksen käytävältä mitattiin kohonneita mineraalikuitupitoisuuksia. Merkittävimpänä kuitulähteenä toimivat alaslaskettujen kattojen ("lautex") mineraalivillaeristeet. Mineraalivillaa esiintyi myös suoraan metallikasettirakenteisen alakaton päällä ja alakatossa kulkee myös lämpöputkia, joiden mineraalivillapintaiset eristykset olivat pinnoittamattomia. Rakennuksen vanhan osan alkuperäisissä tuloilmakoneissa havaittiin silmämääräisesti myös epäpuhtauksia ja mineraalivillalähteitä.

Sisäilman laadun kannalta yhtenä riskinä kohteessa pidettiin kosteuden nousua erityisesti kantavien väliseinien kohdalla sekä niissä kohdissa ulkoseinillä, joissa jalkalistana on muovinen jalkalista. Pintakosteusmittausten ja silmämääräisten havaintojen perusteella kosteus oli paikoin kerääntynyt näissä kohdissa muovisen jalkalistan taakse. Ulkoseinillä oli paikoin jo tehty korjauksia ja tiivistyksiä todetun kosteuden nousun takia. Yhdessä tilassa ulkoseinän yläosassa maalipinnassa havaittiin kupruilua pienellä alueella. Syyksi oli todettu todennäköisesti vesikaton/katoksen liittymäkohta. Tutkimuksessa ei otettu materiaalinäytteitä.

### ***Epäpuhtauksien kulkeutumisen arviointi:***

Alapohjan ja ulkoseinän liittymään tehtyjen tiivistysten kunto oli todettu raportissa kohtalaisen hyväksi. Raportissa mainittiin myös, että pistemäisten epätiiveyskohtien esiintyminen on havainnoista huolimatta mahdollista ja kyseisistä kohdista voi tulla sisätiloihin esim. maaperän hajua, jos tilat ovat alipaineisia. Edellä mainittuja mahdollisia ilmapuottoja pidettiin raportissa sisäilman kannalta riskitekijöinä.

Tutkimuksessa oli mitattu painesuhteita ulkovaipan yli. Luokkatilojen painesuhteiden todettiin olevan hyvällä tasolla. Osassa tiloissa, muun muassa teknisentyön tiloissa oli huomattavaa ylipainetta, jonka seurauksena puupöly ja muut epäpuhtaudet voivat kulkeutua käytäville ja edelleen luokkiin.

## **6.1.5 Case 5**

### ***Kohteen esittely:***

Case 5 oli epäillyn sisäilmaongelman tutkiminen 1980-luvulla rakennetusta päiväkodista, johon on tehty korjauksia 2000-luvulla. Tiloissa oli epäilty sisäilmaongelmia ja käyttäjiltä saatujen tietojen mukaan sisäilma on koettu huonoksi. Örebro-tutkimuksen koosteen perusteella kohteessa merkittäväksi tekijäksi oli noussut tunkkainen ilma ja riittämätön il-

manvaihto. Oireina oli koosteessa nostettu esiin väsymys, päänsärky, silmien ärtyminen, käheys/kurkun kuivuus, yskä ja käsien ihon kuivuus. Henkilökunnan ryhmittäin täyttämässä sisäilmakaavakkeissa oli noussut edellä mainittujen lisäksi esiin myös lämpöolosuhdeongelmia ja hajuja.

#### ***Kohteessa havaitut epäpuhtauslähteet:***

Rakenteellisesti merkittävämät tekijät sisäilman kannalta ovat rakenteista tulevat ilmapuodot. Erityisesti ilmapuotoja oli havaittavissa yläpohjan osalla ja ne korostuivat ennen kaikkea alaslaskettujen kattojen osalla (käytävät), joissa ontelolaatan saumat ovat kokonaan tiivistämättä samoin kuin läpiviennit yläpohjaan.

Yksittäisinä sisäilmaan vaikuttavina asioina raportissa mainittiin ikkunaliittymistä aiheutuneet, silmämääräisesti havaitut paikalliset kosteusrasitukset sisäpinnan rakenteisiin. Ikkunoissa havaittiin myös kuitulähteitä (ikkunatilkkeet). Geeliteippimenetelmällä otetuissa näytteissä kuitujen toimenpiderajat ylittyivät kahdessa näytteessä kuudesta. Yksittäisten tekijöiden, kuten viemärikaivojen tarkastusluukkujen ja sähköpääkeskuksen havaittiin aiheuttavan tiloihin epämiellyttävää hajua. Materiaalinäytteitä rakenteista ei tutkimuksessa otettu.

#### ***Epäpuhtauksien kulkeutumisen arviointi:***

Tutkimuksessa oli mitattu painesuhteita ulkovaipan yli. Tiloissa havaittiin käytön aikana suositeltua suurempaa alipaineisuutta. Ilmapuotokohtia tutkimuksessa oli havainnoitu aistinvaraisten havaintojen lisäksi tekemällä lämpökamerakuvauksia.

## **6.2 Yhteenveto case-kohteista**

Case-kohteista löytyi useita kirjallisuudessa esiteltyjä menetelmiä, joilla epäpuhtauksien esiintymistä oli tutkittu. Materiaalinäytteitä mikrobianalyysiin oli otettu kolmessa case-kohteessa, VOC- ja PAH-näytteitä kahdessa case-kohteessa ja asbestinäytteitä yhdessä case-kohteessa. Kaikissa kohteissa oli otettu pyyhintänäytteet pölynkoostumuksen arvioimiseksi ja kolmessa case-kohteessa oli otettu myös mineraalivillakuitunäytteitä geeliteippimenetelmällä kuitujen esiintymisen tarkemmaksi arvioimiseksi.

Epäpuhtauksien kulkeutumisen arviointiin käytettyjä menetelmiä olivat case-kohteissa painesuhdemittaukset, merkkiainekokeet, lämpökuvaukset ja aistinvaraiset havainnot. Kahdessa case-kohteessa oli tehty merkkiainekokeita ja yhdessä lämpökuvauksia. Painesuhdemittauksia oli tehty kaikissa case-kohteissa. Painesuhdemittauksia ulkovaipan

yli oli tehty kolmessa case-kohteessa, minkä lisäksi kahdessa muussa case-kohteessa painesuhdemittauksia ulkovaipan yli oli raporttien perusteella tehty aikaisemmissa tutkimuksissa. Lisäksi painesuhdemittauksia oli tehty case-kohteissa muun muassa putki- ja tekniikkakanaaleihin sekä alapohjan ryömintätilaan.

Osassa case-kohteissa havaittiin huomattavaa alipaineisuutta sisä- ja ulkovaipan välisessä painesuhdemittauksessa. Alipaineisuus yhdistettynä vanhoille rakennuksille tyyppilliseen heikompaan ilmatiiveyteen mahdollistivat case-kohteissa vuotoreittien löytämisen merkkiainekokeilla ilman erillistä tilojen alipaineistusta, jolloin havainnot kuvaavat hyvin tiloissa vallitsevia olosuhteita. Yhdessä case-kohteessa havaittiin merkkiainekokeilla vuotoja vaurioituneista rakenteista, vaikka paine-ero ulkovaipan yli oli vain  $-1 \dots -3$  Pa sisäpuolen ollessa alipaineinen.

Case-kohteissa merkkiainekokeet oli suoritettu laskemalla merkkiainetta noin litra tutkitavan kohdan läheisyyteen, minkä jälkeen rakenteita tarkasteltiin kaasun laskukohdan ympäriltä noin metrin säteellä, merkkiaineanalysaattorin herkkyyden ollessa 5 (asteikolla  $1 \dots 10$ ). Pistokoemaisesti suoritettujen kokeiden havaintojen johtopäätöksenä oli, että tuloksia voidaan yleistää myös kohteen muihin vastaaviin rakenteisiin. Merkkiainekokeet oli suoritettu rakennusosiin, joissa oli havaittu viitteitä vaurioista.

Ala- ja välipohjien sekä ulkoseinien välisten rakenneliittymien merkkiainekokeissa yhteneväistä oli, että rakenneliittymiä ei ollut muovisten jalkalistojen liimausta lukuun ottamatta erikseen tiivistetty. Ikkunaliittymien tiiveys case-kohteissa vaikutti olevan puisten ikkunalistojen kiinnityksen ja maalipinnan varassa. Case-kohteiden 2 ja 3 merkkiainekokeissa havaituista vuodoista kuvien perusteella yhteensä noin 67 % oli merkittäviä. Vuodoista pistemäisiä kuvien perusteella oli noin 33 %. Case-kohteissa kuvien perusteella pistemäiset vuodot voidaan kuitenkin tulkita sisäilman laadun kannalta merkittäviksi, jos muut havainnot rakenneliittymistä ja vaurioiden laajuudet otetaan huomioon.

Merkkiainekokeiden suorituksen kannalta on merkitsevää, onko rakenneliittymissä listat paikallaan. Listojen ollessa paikallaan, voidaan vuotoja todeta pistemäisesti kohdista, joissa esimerkiksi muovisten jalkalistojen liimaus on pettänyt tai puisten listojen maalaus halkeillut. Listat voivat parhaassa tapauksessa tiivistää rakenneliittymää hyvinkin merkittävästi, mutta haluttaessa saada tarkempaa tietoa rakenneliittymän tiiveydestä on varmasti suositeltavaa poistaa lista hetkellisesti, jotta rakenneliittymien mahdollisiin epätiiveyskohtiin päästään tarkemmin käsiksi.

Case-kohteet ja yleisesti myös muut kuntotutkimuksissa tutkittavat rakennukset ovat usein vanhempaa rakennuskantaa, joissa ilmatiiveyteen ei ole rakennusajankohtana



välttämättä kiinnitetty erityisemmin huomiota. Rakenneliittymissä voi olla runsaasti vuotoja, ja suuri määrä merkkiaineikaasua voisi levitä tilaan hyvinkin nopeasti ja estää tarkemman havainnoinnin. Pienempi määrä merkkiaineikaasua verrattuna RT 14-11197-ohjekortissa suositeltuun laskennalliseen kaasun määrään vaikuttaa toimivalta ratkaisulta tilanteessa, jossa pistokoemaisesti testataan tietyn rakenneliittymän tiiveyttä pienellä alueella. Pistokoemaisesti tehdyissä merkkiainekokeissa tehdyt havainnot voivat antaa riittävän tiedon tarkasteltavien rakenneliittymien tiiveydestä korjaussuunnittelua varten, mikäli havainnot ovat riittävän selkeitä ja rakenneliittymien toteutustapa ei poikkea muualla kohteen vastaavissa rakenteissa. Esimerkiksi, jos pistokoemaisesti tutkittavassa rakenneliittymässä esiintyy merkittävää vuotoa, on tilanne todennäköisesti vastaavanlainen muissa vastaavissa kohteen rakenneliittymissä. Case-kohteissa tutkimuksen kohteena olleissa tiloissa koettu oireilu, rakenteista löydettyt vauriot ja suotuisat paine-erot sisäilmaan kohden oleville virtauksille yhdistettynä merkkiainekokeilla havaituihin vuotoreitteihin antoivat kattavat tiedot altistumisolosuhteiden arvioinnille.

## 7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomalaisessa olemassa olevassa rakennuskannassa on lähes väistämättä kirjallisuuslähteiden esittelemiä vuotoreittejä epäpuhtauksien leviämiseen. Ilmatiiveydeltään heikkoja rakenteita löytyy kirjallisuuslähteiden mukaan sitä enemmän, mitä vanhempaa rakennuskanta on. Rakennusten huono ilmatiiveys hankaloittaa myös painesuhteiden hallintaa. Vanhoissa rakennuksissa rakenteiden huono ilmatiiveys ja painesuhteiden hankala hallinta luovat otolliset olosuhteet epäpuhtauksien leviämiselle sisäilmaan. Vanhoille rakennuksille tyypillisiä epätiiveyskohtia ja hallitsemattomia painesuhteita oli havaittavissa myös case-kohteissa.

Vallitsevien painesuhteiden mittaus rakenteiden yli on aina oleellista epäpuhtauksien kulkeutumisen arvioinnissa, sillä suuret paine-erot voivat voimistaa epäpuhtauksien kulkeutumista rakenteista sisäilmaan. Tutkimusten perusteella on kuitenkin havaittavissa, että jo hyvinkin pienillä paine-eroilla voi rakenteiden epätiiveyskohtien kautta kulkeutua mahdollisia epäpuhtauksia sisäilmaan. Case-kohteissa oli havaittu rakenteissa vuoto-kohtia merkkiainekokeilla jopa alle 3 Pa paine-erolla. Lisäksi, kuten Liu ja Nazaroff (2003) laboratoriotutkimuksessaan havaitsivat, jo 4 Pa paine-erossa partikkelit, joiden halkaisija oli 0,02–7 µm, pääsivät kulkeutumaan rakenteesta riippumatta pääosin täydellisesti raosta, jonka halkaisija oli vain 1 mm. He havaitsivat myös, että vastaavassa paine-erossa partikkelit, joiden halkaisija oli 0,1–1 µm, pääsivät kulkeutumaan 0,25 mm suuruisen raon läpi pääosin täydellisesti (Liu & Nazaroff 2003). Tutkitut partikkelit vastaavat hyvin pienhiukkasten (PM<sub>2.5</sub>) ja karkeiden hiukkasten (PM<sub>10</sub>) kokoluokkia ja tutkitut rakojen koot yleisesti rakennuksista löytyvien rakojen ja halkeamien kokoluokkia.

Useassa epäpuhtauksien kulkeutumista käsittelevässä tutkimuksessa tutkimusmenetelmänä on käytetty sisäilman mikrobinäytteitä. Tutkimusten perusteella sisäilmasta otetut mikrobinäytteet eivät välttämättä osoita selkeänkään kosteus- ja mikrobivaurion kohdalla sisäilmassa merkkejä mikrobeista (Morey et al. 2002; Jalkanen et al. 2019). Päckilän (2012) tutkimuksessa myöskään rakennuksen alipaineistus ei lisännyt merkittävästi sieni-itiöiden määrää sisäilmanäytteissä. Arvioitaessa epäpuhtauksien kulkeutumista, sisäilman mikrobinäytteiden käyttö muita tutkimusmenetelmiä tukevana menetelmänä voi-kin johtaa kokonaisuuden kannalta ristiriitaisiin johtopäätöksiin. Mikrobien käyttäytymisestä tarvittaisiinkin myös tulevaisuudessa tarkempaa tutkimusta. Sisäilmanäytteiden kannalta olisi oleellista ymmärtää, miksi mikrobeita välillä kulkeutuu rakenteista sisäilmaan ja välillä ei, vaikka olosuhteet olisivat identtisiä.

Case-kohteissa ei ollut käytetty epäpuhtauksien leviämisen tarkastelussa kirjallisuudessa usein esiintyvää sisäilman mikrobinäytteenottoa. Case-kohteissa epäpuhtauksien kulkeutumisen arviointiin käytettyjä menetelmiä olivat painesuhdemittaukset, aistinvaraiset havainnot, merkkiainekokeet ja lämpökuvaukset. Painesuhteiden ollessa otolliset epäpuhtauksien kulkeutumiselle, vaikuttivat merkkiainekokeet case-kohteiden perusteella hyvin toimivalta tutkimusmenetelmältä epäpuhtauksien kulkeutumisen arvioimiseksi. Merkkiainekokeen tulevaisuuden kannalta olisi hyödyllistä tutkia, voisiko merkkiainekoeanalysoijan herkkyydelle ja vuotoreitin suuruudelle löytyä johdonmukaisuutta. Tällä hetkellä merkkiainekokeen tutkijan ammattitaidolla ja kokemuksella on suuri merkitys tulosten tulkinnan kannalta. Merkkiaineanalysoijan herkimpiä asetuksia käyttäessä olemassa on riski, että vuotoreittinä pidetään sellaista vuotoa, jonka kautta epäpuhtauksia ei oikeasti pääse leviämään.

Suomessa sisäilmaongelmat ovat olleet paljon esillä mediassa, ja aiheeseen liittyy vielä useita vastaamattomia kysymyksiä. Tulevaisuudessa tarvitaan vielä lisää tutkimuksia liittyen sisäilman epäpuhtauksiin, niiden syntymekanismeihin sekä leviämistapoihin, jotta voidaan taata ihmisille terveellinen ja kestävä elinympäristö.

# LÄHTEET

- Arvela, H., Holmgren, O. & Reisbacka, H. (2012). Asuntojen radonkorjaaminen. STUK-A252 Saatavissa (20.2.2019): <http://www.julkari.fi/handle/10024/124067>.
- Hänninen, O. & Asikainen, A. (2013). Efficient reduction of indoor exposures-Health benefits from optimizing ventilation, filtration and indoor source controls. Työterveyden ja hyvinvoinnin laitos Saatavissa (20.2.2019): <http://www.julkari.fi/handle/10024/110211>.
- Jalkanen, K., Täubel, M., Vepsäläinen, A., Valkonen, M., Huttunen, K., Köliö, A. & Hyvärinen, U. (2019). Eri menetelmien ja näytetyyppien testaaminen vaurio- ja vertailurakennusten erottamiseksi. Julkaisussa M Ahola & A Merikari (toim.), Sisäilmastoseminaari 2019, Messukeskus, Helsinki 14.3.2019. SIY Raportti, no. 37, SIY SISÄILMATIETO OY, s. 175–178.
- Kosteus- ja homevaurioista oireileva potilas. Käypä hoito -suositus. (2016). Suomalaisen Lääkäriseuran Duodecimin asettama työryhmä. Helsinki: Suomalainen Lääkäriseura Duodecim, 2016 (viitattu 05.06.2019). Saatavilla internetissä: [www.kaypahoito.fi](http://www.kaypahoito.fi)
- Lammi, T. (2016). Epäpuhtauksien hallinta rakenteiden alipaineistuksen avulla. Opinnäytetyö, rakennusterveysasiantuntija. Rakennusteollisuuden Koulutuskeskus. Helsinki. 62 s.
- Leivo, V., Aaltonen, A., Turunen, M., Pekkonen, M. & Haverinen-Shaughnessy, U. (2014). Sisäympäristön laatu ja asumisterveys energiakorjattavissa asuinkerrostaloissa. Julkaisussa J Säteri & H Backman (toim.), Sisäilmastoseminaari 2014, Messukeskus, Helsinki 13.3.2014. SIY Raportti, no. 32, SIY SISÄILMATIETO OY, s. 225–228, Sisäilmastoseminaari, 1/01/00.
- Li, Y. & Chen, Z. (2003). A balance-point method for assessing the effect of natural ventilation on indoor particle concentrations. *Atmospheric Environment*, vol. 37, no. 30, pp. 4277–4285.
- Liu, D.L. & Nazaroff, W.W. (2001). Modeling pollutant penetration across building envelopes. *Atmospheric Environment*, vol. 35, no. 26, pp. 4451–4462.
- Liu, D.L. & Nazaroff, W.W. (2003). Particle penetration through building cracks. *AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 37, no. 7, pp. 565–573.
- Morey, P., Andrew, M., Ligman, B. & Jarvis, J. (2002). Hidden mold sometimes enters the indoor air. In *Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Monterey, Calif. Edited by H. Levine and G. Bendy. International Academy of Indoor Air Sciences. pp. 455–460.
- Mosley, R.B., Greenwell, D.J., Sparks, L.E., Guo, Z., Tucker, W.G., Fortmann, R. & Whitfield, C. (2001). Penetration of ambient fine particles into indoor environment. *AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY* VOL. 34, no. 1 pp. 127–136.
- Mäkeläinen, I., Kinnunen, T., Reisbacka, H., Valmari, T. & Arvela, H. (2009). Radon suomalaisissa asunnoissa. Otantatutkimus 2006, STUK. Saatavissa (20.2.2019): <http://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/123584/stuk-a242.pdf?sequence=1>.
- Nazaroff, W.W. (2016). Indoor bioaerosol dynamics. *Indoor air*, vol. 26, no. 1, pp. 61–78.
- Popescu, L. & Limam, K. (2012). Particle penetration research through buildings' cracks. *HVAC&R Research*, vol. 18, no. 3, pp. 312–322.

- Päkkilä, T. (2012). Mikrobin kulkeutuminen sisäilmaan paine-eron vaikutuksesta. Diplomityö. Aalto yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, rakenne- ja rakennustuotantotekniikka. Espoo. 148 + 62 s.
- Reijula, K., Ahonen, G., Alenius, H., Holopainen, R., Lappalainen, S., Palomäki, E., Reiman, M. (2012). Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1.
- Rundt, A. R., Backlund, P. & Paakkola, K. (2005). Sisäilman hajut ja orgaaniset epäpuhtaudet. Työterveyslääkäri [verkkolehti] no. 23, s. 156–163. Saatavissa (21.3.2019): [https://www.ebm-guidelines.com/dtk/shk/avaa?p\\_artikkeli=ttl00208](https://www.ebm-guidelines.com/dtk/shk/avaa?p_artikkeli=ttl00208).
- RT 80-10974. (2009). Teollisesti valmistettujen asuinrakennuksen ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. RT-ohjekortti. Rakennustieto.
- RT 14-11197. (2015). Rakenteiden ilmatiivyyden tarkastelu merkkiainekokein. RT-ohjekortti. Rakennustieto.
- RT 14-11239. (2016). Rakennuksen lämpökuvaus. RT-ohjekortti. Rakennustieto.
- RT 07-11299. (2018). Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohteet ja tuotevaatimukset. RT-ohjekortti. Rakennustieto.
- Sosiaali- ja terveysministeriö. (2003). Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita, Asumisterveysohje (kumottu osittain asumisterveysasetuksella).
- Sosiaali- ja terveysministeriö. (2015). Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista”, Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö, Asumisterveysasetus.
- Sosiaali- ja terveysministeriö. (2018). Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018. Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö, Voimaantulo: 15.12.2018.
- Säteri, J., Kovanen, K. & Pallari, M.L. (1999). Kerrostalojen sisäilmaston ja energiatalouden parantaminen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- Tuomainen, M., Ahola, M., & asiantuntijaryhmä (2019). Ilmanvaihdon toiminta ja käyntiajat – kuntien sisäilmaverkoston yleisohje. Julkaisussa M Ahola & A Merikari (toim.), Sisäilmastoseminaari 2019, Messukeskus, Helsinki 14.3.2019. SIY Raportti, no. 37, SIY SI-SÄILMATIETO OY, s. 131–136
- Täubel, M., Leppänen, H., Korkalainen, M. and Hyvärinen, A. (2017). Microbial exposure in moisture damaged schools - an occupational health risk for teachers? Final report of the MIKOKO project, National Institute for Health and Welfare, Discussion paper 36/2017.
- Valvira. (2016a). Asumisterveysasetuksen soveltamisohje Osa I. Valviran julkaisu 23.3.2016 (päivitetty 25.4.2016). Viitattu 13.3.2019.
- Valvira. (2016b). Asumisterveysasetuksen soveltamisohje Osa III. Valviran julkaisu 11.4.2016. Viitattu 13.3.2019.
- Valvira. (2016c). Asumisterveysasetuksen soveltamisohje Osa IV. Valviran julkaisu 26.4.2016. Viitattu 13.3.2019.

- Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Ilkka, V., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. (2005). Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. (2010). Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Wang, K., Jansen, D.C., Shah, S.P. & Karr, A.F. (1997). Permeability study of cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 3, pp. 381–393.
- Weckstörn, A. (2003). Mikrobiperäisten haihtuvien orgaanisten yhdisteiden diffuusio rakenteiden läpi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. 77 s.
- World Health Organization. (2006). Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. World Health Organization.
- World Health Organization. (2010). WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants. København, Denmark: WHO Regional Office for Europe.
- Ympäristöministeriö. (2003). D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Helsinki: Ympäristöministeriö (kumottu)
- Ympäristöministeriö. (2017). Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energia tehokkuudesta 1010/2017. Helsinki: Ympäristöministeriö, Voimaantulo: 01.01.2018.
- Ympäristöopas 2016. Pitkäranta, M. (toim.) (2016). Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö. Saatavissa (21.4.2019): <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/75517>.